

# **Handbuch der Schweißverfahren**

**Teil II:**

**Autogentechnik, Thermisches Schneiden,  
Elektronen-/Laserstrahlschweißen,  
Reib-, Ultraschall- und  
Diffusionsschweißen**

**von**

**D. Böhme und F.-D. Hermann  
unter Mitarbeit von**

**H. Mair, H. Schultz, T. Wahl und M. Weinreich**

# Inhaltsverzeichnis

## Vorwort

<b>1</b>	<b>Autogentechnik</b> .....	1
1.1	Grundsätzliches zur Autogentechnik .....	1
1.1.1	Zur Geschichte der Autogentechnik .....	1
1.1.2	Einteilung der Verfahren der Autogentechnik .....	2
1.1.3	Betriebsmittel für die Verfahren der Autogentechnik .....	2
1.1.3.1	Sauerstoff .....	2
1.1.3.1.1	Eigenschaften und Erzeugung des Sauerstoffs .....	2
1.1.3.1.2	Bereitstellung und Verteilung des Sauerstoffs .....	4
1.1.3.2	Brenngase .....	7
1.1.3.2.1	Acetylen .....	7
1.1.3.2.1.1	Eigenschaften und Erzeugung des Acetylens .....	8
1.1.3.2.1.2	Bereitstellung und Verteilung des Acetylens .....	13
1.1.3.2.2	Flüssiggas .....	19
1.1.3.2.2.1	Eigenschaften und Erzeugung des Flüssiggases .....	19
1.1.3.2.2.2	Bereitstellung und Verteilung des Flüssiggases .....	19
1.1.3.2.3	Erdgas .....	20
1.1.3.2.3.1	Eigenschaften des Erdgases .....	20
1.1.3.2.3.2	Bereitstellung und Verteilung des Erdgases .....	21
1.1.3.3	Sicherheitshinweise und -vorschriften für den Umgang mit Sauerstoff und Brenngasen .....	21
1.1.4	Die Autogenflamme .....	22
1.1.4.1	Die Verbrennung .....	23
1.1.4.2	Die Flammeneinstellung .....	25
1.1.4.2.1	Die neutrale Flamme .....	25
1.1.4.2.2	Die Sauerstoff-Überschuß-Flamme .....	26
1.1.4.2.3	Die Acetylen-Überschuß-Flamme .....	26
1.1.4.2.4	Die „harte“ und die „weiche“ Flamme .....	26
1.1.4.2.5	Flammenstörungen .....	26
1.1.5	Autogenbrenner .....	27
1.1.6	Armaturen und Zubehör .....	30
1.1.6.1	Druckminderer .....	30
1.1.6.2	Gasschläuche .....	32
1.1.6.3	Sicherheitseinrichtungen .....	32
1.2	Die Verfahren der Autogentechnik .....	35
1.2.1	Das Gasschweißen .....	35
1.2.1.1	Methoden des Gasschweißens .....	36
1.2.1.1.1	Nachlinksschweißen (NL) .....	36
1.2.1.1.2	Nachrechtsschweißen (NR) .....	36
1.2.1.1.3	Beidseitiges Schweißen .....	37
1.2.1.2	Schweißnahtvorbereitung und Fugenform .....	38
1.2.1.3	Zusatzwerkstoffe und Hilfsstoffe zum Gasschweißen .....	39
1.2.1.4	Gasschweißen verschiedener metallischer Werkstoffe .....	39
1.2.1.5	Anwendungsbereiche des Gasschweißens .....	43
1.2.2	Das Gaspreßschweißen .....	45
1.2.3	Beschichten unter Anwendung der Gasflamme .....	47
1.2.3.1	Gas-Auftragschweißen .....	48

1.2.3.2	Panzern .....	48
1.2.4	Flammlöten .....	51
1.2.5	Flammrichten .....	54
1.2.5.1	Prinzip des Flammrichtens .....	54
1.2.5.2	Flammrichten verschiedener Werkstoffe .....	57
1.2.5.3	Anwendungsbeispiele des Flammrichtens .....	57
1.2.6	Flammwärmen .....	61
1.2.6.1	Vorwärmen – Nachwärmen .....	61
1.2.6.2	Warmformgebung .....	62
1.2.7	Flammhärten .....	63
1.2.7.1	Das Prinzip des Flammhärtens .....	63
1.2.8	Das Flammentspannen .....	66
1.2.9	Flammstrahlen .....	69
1.2.9.1	Flammstrahlen von Stahl .....	70
1.2.9.2	Flammstrahlen von Beton und Gestein .....	70
1.2.9.3	Ausführung des Flammstrahlens .....	71
Schrifttum .....		72

<b>2</b>	<b>Thermisches Schneiden .....</b>	<b>73</b>
2.1	Einteilung der Schneidverfahren .....	73
2.2	Autogenes Brennschneiden .....	75
2.2.1	Grundlagen des Brennschneidens .....	75
2.2.2	Brenngas und Sauerstoff .....	79
2.2.3	Schneidbrenner .....	79
2.2.4	Schneiddüsen .....	81
2.2.5	Inbetriebnahme eines Schneidbrenners .....	83
2.2.6	Brennschneiden .....	83
2.2.6.1	Güte und Maßtoleranzen der Schnittflächen .....	86
2.2.6.2	Brennschneidfehler .....	89
2.2.7	Brennschneidmaschinen .....	89
2.2.7.1	Brennschneidmaschinen-Steuerungen .....	95
2.2.7.2	Brennschneidmaschinen-Antriebe .....	96
2.2.7.3	Sonder- und Hilfseinrichtungen .....	97
2.2.8	Arbeitsschutz beim Brennschneiden .....	99
2.2.8.1	Körperschutzmaßnahmen .....	99
2.2.8.2	Brenngase und Sauerstoff .....	100
2.2.8.3	Geräte und Armaturen .....	101
2.2.8.4	Brandgefahr .....	101
2.2.9	Wirtschaftliches Brennschneiden .....	102
2.3	Sonderverfahren .....	103
2.3.1	Pulverbrennschneiden .....	103
2.3.2	Brennbohren .....	105
2.3.3	Brennhobeln .....	106
2.3.3.1	Brennfugen .....	107
2.3.3.2	Lichtbogen-Druckluftfugen .....	109
2.3.3.3	Lichtbogen-Sauerstoffschnitten .....	110
2.4	Plasmaschneiden .....	112
2.4.1	Grundlagen der Plasmatechnologie .....	112
2.4.2	Verfahrensprinzip des Plasmaschneidens .....	115
2.4.3	Plasmapbildende Medien .....	119

2.4.3.1	Argon . . . . .	119
2.4.3.2	Wasserstoff . . . . .	120
2.4.3.3	Stickstoff . . . . .	121
2.4.3.4	Luft . . . . .	121
2.4.3.5	Wasser . . . . .	122
2.4.4	Verfahrenstechniken . . . . .	122
2.4.4.1	Argon-Wasser-Stickstoff-Plasmaschneiden . . . . .	122
2.4.4.2	Druckluft-Plasmaschneiden, Sauerstoff-Plasmaschneiden . . . . .	123
2.4.4.3	Wasser-Injektion, Unterwasserplasmaschneiden . . . . .	124
2.4.5	Ausrüstung zum Plasmaschneiden . . . . .	128
2.4.5.1	Stromquellen . . . . .	128
2.4.5.2	Brenner . . . . .	130
2.4.5.2.1	Düse . . . . .	131
2.4.5.2.2	Elektrode . . . . .	133
2.4.5.3	Steuerung . . . . .	135
2.4.5.4	Führungsmaschinen und Hilfseinrichtungen zum vollmechanischen Schneiden . . . . .	136
2.4.6	Schnitteigenschaften . . . . .	139
2.4.6.1	Schnittgüte . . . . .	140
2.4.6.2	Schneidfehler . . . . .	142
2.4.7	Werkstoffe und zugeordnete Schneidaten . . . . .	143
2.4.8	Arbeitsschutz beim Plasmaschneiden . . . . .	148
2.4.8.1	Leerlaufspannung . . . . .	148
2.4.8.2	Lärm . . . . .	149
2.4.8.3	Strahlung . . . . .	150
2.4.8.4	Gase und Stäube . . . . .	151
2.4.8.5	Schutz- und Abhilfemaßnahmen . . . . .	155
2.4.9	Hinweise zu Wirtschaftlichkeitsüberlegungen . . . . .	158
2.5	Laserstrahlschneiden . . . . .	164
2.5.1	Einleitung . . . . .	164
2.5.2	Laserstrahlschneidverfahren . . . . .	165
2.5.2.1	Laserstrahl-Brennschneiden . . . . .	165
2.5.2.2	Laserstrahl-Schmelzschneiden . . . . .	165
2.5.2.3	Laserstrahl-Sublimierschneiden . . . . .	166
2.5.3	Laserstrahl-Schneidanlage . . . . .	167
2.5.4	Einflußfaktoren beim Laserstrahlschneiden . . . . .	167
2.5.4.1	Strahlparameter . . . . .	167
2.5.4.2	Strahlgeometrie . . . . .	172
2.5.4.3	Schneidgase . . . . .	175
2.5.4.4	Werkstoffe . . . . .	176
2.5.4.5	Handhabungssysteme . . . . .	179
2.5.5	Schnittqualität . . . . .	180
2.5.5.1	Schnittflächengüte . . . . .	180
2.5.5.2	Maßtoleranzen . . . . .	181
2.5.5.3	Kennzeichnung der Schnittgüte und der Toleranzklasse . . . . .	183
2.5.6	Anwendungsbereiche der verschiedenen thermischen Schneidverfahren Laserstrahl-Brennschneiden, Plasmaschneiden und autogenes Brennschneiden . . . . .	183
2.5.6.1	Beispiele laserstrahlgeschnittener Werkstücke . . . . .	184
2.5.6.2	Beispiele plasmageschnittener Werkstücke . . . . .	186

2.5.6.3	Beispiele autogenbrenngeschnittener Werkstücke .....	189
2.5.7	Wirtschaftliche Gesichtspunkte zu den thermischen Schneidverfahren .....	193
2.5.7.1	Fertigungskostensatz .....	193
2.5.7.2	Maschinenstundensatz .....	193
2.5.7.3	Ermittlung des Maschinenstunden- und Fertigungskostensatzes .....	195
2.5.7.4	Schnittmeter-Kostenanalyse .....	195
Schrifttum	.....	201
<b>3</b>	<b>Elektronenstrahlschweißen</b> .....	204
3.1	Einführung .....	204
3.2	Physikalische Grundlagen .....	205
3.2.1	Erzeugung des Elektronenstrahles .....	205
3.2.2	Fokussieren und Ablenken des Elektronenstrahles .....	206
3.2.3	Strahldiagnostik .....	206
3.2.4	Vakuum .....	206
3.3	Eindringen des Elektronenstrahles in Metalle .....	206
3.3.1	Vorgänge an der Strahlauftreffstelle .....	206
3.3.2	Tiefschweißeffekt .....	208
3.4	Schweißbeignung metallischer Werkstoffe .....	209
3.4.1	Allgemeines .....	209
3.4.2	Stähle .....	210
3.4.3	Nichteisenmetalle .....	211
3.4.4	Werkstoffkombinationen .....	211
3.5	Vorbereitung der Werkstücke .....	212
3.5.1	Allgemeines .....	212
3.5.2	Oberflächenbearbeitung, Reinigen, Spaltbreite .....	213
3.5.3	Nahtformen .....	214
3.5.4	Rundnähte .....	216
3.5.5	Entlüftungsöffnungen .....	216
3.5.6	Schweißverzug .....	217
3.5.7	Schweißvorrichtungen .....	218
3.6	Elektronenstrahl-Schweißmaschine .....	219
3.6.1	Grundaufbau .....	219
3.6.2	Elektronenstrahlkanone .....	219
3.6.3	Arbeitskammer .....	221
3.6.4	Bewegungseinrichtungen, Vorrichtungen .....	221
3.6.5	Hochspannungsversorgung .....	223
3.6.6	Steuer- und Regeleinrichtungen .....	224
3.6.7	Vakuumeinrichtungen .....	227
3.7	Geschweißte Bauteile .....	228
3.8	Regelwerke .....	232
3.8.1	DIN-Normen .....	232
3.8.2	DVS-Merkblätter und -Richtlinien .....	233
3.8.3	Sonstige Regelwerke .....	234
Schrifttum	.....	235
<b>4</b>	<b>Laserstrahlschweißen</b> .....	237
4.1	Lasergrundlagen .....	237
4.1.1	Grundlagen .....	238
4.1.1.1	Allgemeines Laserprinzip .....	239

4.1.1.2	Lasertypen	243
4.1.1.2.1	Festkörperlaser	243
4.1.1.2.2	Der Gas-Laser	246
4.1.1.2.2.1	CO <sub>2</sub> -Laserarten	248
4.1.1.2.2.2	CO <sub>2</sub> -Hochfrequenzlaser	249
4.2	Einbindung des Laserstrahlschweißens in die Fügeverfahren nach DIN 1910 und Merkblatt DVS 3203	250
4.3	Physikalisch-technologische Grundlagen des Laserstrahlschweißens	251
4.3.1	Der Laser	251
4.3.1.1	Prozeßrelevante Laserparameter	251
4.3.2	Strahlführung	253
4.3.2.1	Prozeßrelevante Parameter der Strahlführung	254
4.3.3	Fokussierung und Schutz-/Arbeitsgasführung	255
4.3.4	Bearbeitungsmaschine	256
4.3.4.1	Prozeßrelevante Maschinenparameter	257
4.4	Besonderheiten des Laserstrahlschweißens	257
4.5	Physik des Laserstrahlschweißens	259
4.6	Laserstrahlschweißverfahren	261
4.6.1	Übersicht über die Schweißbeignung von Werkstoffen und Nahtgeometrien	261
4.6.2	Beispiele aus der industriellen Fertigung	261
4.6.2.1	Einsatzgebiet Feinwerktechnik und Elektrotechnik	262
4.6.2.2	Einsatzgebiet Dünnschweißens (Karosserie- und Behälterbau)	262
4.6.2.3	Aggregatefertigung in der Automobil- und -zulieferindustrie	262
4.6.2.4	Stahlhalbzeugefertigung und Schiffbau	263
4.6.2.5	Maschinenbau	263
4.6.2.6	Flugzeugbau	264
4.6.3	Sonderverfahren	264
4.6.3.1	Laserstrahlschweißen mit Zusatzwerkstoff	264
4.6.3.2	Mehrlagiges Schweißen	265
4.6.3.3	Laserstrahlpreßschweißen	265
4.7	Stand der Forschung	266
4.8	Zukunftsaussichten	267
	Schrifttum	267

<b>5</b>	<b>Reibschweißen</b>	269
5.1	Verfahrensvarianten und Ausführungsarten	269
5.2	Verfahrensprinzip	272
5.2.1	Verfahrensablauf	273
5.2.2	Bindungsmechanismus	275
5.3	Maschinen und Einrichtungen für das Reibschweißen	276
5.4	Konstruktive Ausführung von Reibschweißverbindungen	281
5.5	Reibschweißgeeignete Werkstoffe und Werkstoffkombinationen	286
5.5.1	Verbindungen von Stahl mit Stahl	288
5.5.2	Verbindungen von Stahl mit Eisengußwerkstoffen	288
5.5.3	Verbindungen von Stahl mit Aluminium	291
5.5.4	Verbindungen von Aluminium mit Kupfer	291
5.6	Einsatz des Reibschweißens in der industriellen Fertigung	292
5.7	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen	294
	Weiterführendes Schrifttum	295

<b>6</b>	<b>Ultraschallschweißen</b> .....	298
6.1	Verfahrensablauf und Bindungsmechanismus .....	298
6.2	Maschinen und Einrichtungen für das Ultraschallschweißen .....	299
6.3	Konstruktive Ausführung von Ultraschallschweißverbindungen .....	300
6.4	Ultraschallschweißgeeignete Werkstoffe .....	301
6.5	Einsatz des Ultraschallschweißens in der industriellen Fertigung .....	303
	Weiterführendes Schrifttum .....	304
<b>7</b>	<b>Diffusionsschweißen</b> .....	305
7.1	Verfahrensablauf und Bindungsmechanismus .....	305
7.2	Maschinen und Einrichtungen für das Diffusionsschweißen .....	307
7.3	Diffusionsschweißgeeignete Werkstoffe .....	308
7.4	Einsatz des Diffusionsschweißens in der industriellen Fertigung .....	308
	Weiterführendes Schrifttum .....	310